

福島第一原子力発電所から 放出された ^{137}Cs の海洋中の挙動

津旨 大輔

Tsumune Daisuke

1. はじめに

東日本大震災と津波に伴う東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故によって、海洋中にも放射性物質が放出された。2011年3月の事故から3年半以上経過したが、海洋汚染問題に関しても、まだ収束には至っていない。原子力規制庁、福島県、東京電力(株)、研究機関において、海洋中の放射性物質濃度に関する観測・モニタリングが継続しており、その結果はWeb上において公開されている^{1,2)}。観測結果が示すのは、海洋中の放射性物質濃度はおおむね減少したが、事故前よりも高い濃度は観測され続けているということである。2013年12月の時点において北太平洋の中央部分でも事故由来の放射性セシウム137 (^{137}Cs) が観測されている¹⁾。また、福島第一原発の近傍においては事故前よりも高い濃度が継続しており、ある時期から減少していない²⁾。事故収束に向けた現象の理解が重要であるという観点から、これらの観測結果に解釈を加えるため、数値シミュレーションによる取り組みが行われている。本稿では、数値シミュレーションによる解釈も加え、 ^{137}Cs がどのように海洋に放出され、移流拡散したかを沿岸スケールと北太平洋スケールに対して述べる。本誌 TRACER 欄 2011年12月において北太平洋スケールにおける過去の海洋汚染との比較の解説がなされているが³⁾、本稿では主に沿岸域におけるその後の挙動に着目する。

2. 海洋への放出過程

福島第一原発から放出された ^{137}Cs の海洋における挙動を、数値シミュレーションとの組合せによって理解するためには、供給過程及び量を推定する必要がある。水素爆発に伴い大気へ放出された後、降雨とともに海洋へ降下した過程、及び、高濃度汚染水の海洋への直接漏洩過程の2つが大きいと考えられている。海洋で観測された ^{137}Cs 濃度は、これらの影響を複合的に受けているので、それぞれの供給過程の把握のためには、それぞれの寄与を区別する必要がある。 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比の解析によって、それらの寄与を区別した結果、直接漏洩は2011年3月26日から始まり、初期の沿岸域の高い ^{137}Cs 濃度は直接漏洩の影響が大きいと推定された^{4,5)}。

直接漏洩の影響に着目し、単位量の漏洩を設定した ^{137}Cs 濃度の ROMS (Regional Ocean Model System) による福島沖のシミュレーションの結果と福島第一原発近傍の観測結果を比較し、漏洩量の逆推定が行われている⁴⁻⁶⁾。手法の式を以下に示す。

$$\text{漏洩率} \left(\frac{\text{Bq}}{\text{day}} \right) = \frac{\text{観測結果} \left(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right)}{\text{単位量を想定したシミュレーション結果} \left(\frac{\text{Bq}/\text{m}^3}{\text{Bq}/\text{day}} \right)}$$

この手法を用い、2011年3月26日～2012年2月までの1年間で $3.6 \pm 0.7 \text{ PBq}$ の漏洩があったと推定している⁶⁾。推定において不確実性を考慮する必要があるが、ほかの推定結果との比

較においても、放出量は3~6 PBqの範囲内に収束していると考えられる⁶⁾。

漏洩率は、福島第一原発近傍で観測された¹³⁷Cs濃度と比例すると考えられる。図1に福島第一原発近傍の5, 6放水口と南放水口における¹³⁷Cs濃度の観測結果の時系列変化を示す。データはCSV形式で東京電力(株)のWeb上で公開されている²⁾。2011年3月26日~4月6日までの漏洩率は 2.0×10^{14} Bq/dayであり、この期間に約7割の量が漏洩した。2011年4月6日、水ガラスによって目視で確認された漏洩を止めたため、¹³⁷Cs濃度も指数関数的に減少した。しかし漏洩は止まっておらず、3年半後の現在(2014年10月)においても、事故前よりも平均して1,000倍程度高い濃度が観測され続けている。同様の手法で2013年1月以降の漏洩率は 3.0×10^{10} Bq/dayと推定された。図1に示す2013年9月までのシミュレーション結果と観測結果の一致は、これらの漏洩率の推定が妥当であることを示している。これは港湾内の¹³⁷Cs濃度の観測値と港湾の交換係数を用いた推定結果⁷⁾や、東京電力(株)が2013年8月30日に原子力規制委員会の第5回特定原子力施設監視・評価検討会汚染水対策検討ワーキンググループに報告した漏洩率⁸⁾と整合的であった。図1に示すとおり、港湾外の観測値は2013年1月以降から変化を示していないが、港湾内の観測データにおいては減少傾向を示しているものもあり、複数の観測データを用いた解析が望まれる。

沿岸域に関しては直接漏洩の影響が支配的であると推定されているが、観測結果を理解するためのシミュレーションにおいては大気からの降下も考慮する必要がある。大気への放出率の推定結果から大気輸送モデルを用いて海洋への

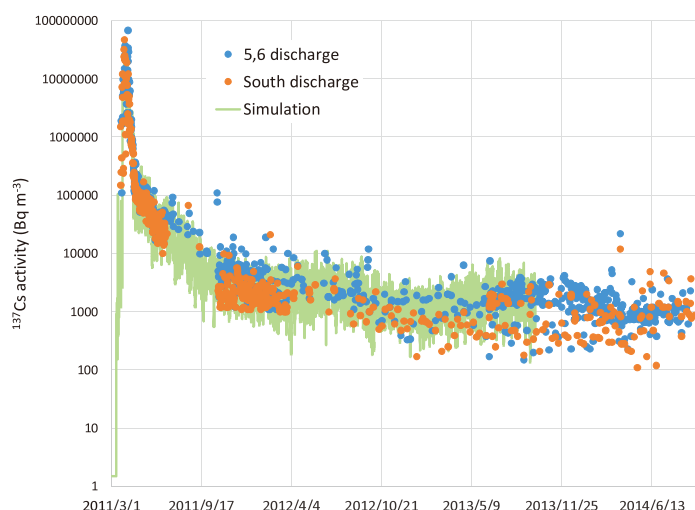


図1 福島第一原子力発電所近傍(5, 6放水口と南放水口)における¹³⁷Cs濃度の観測結果の時系列変化
緑は2013年9月までのシミュレーション結果を示す

降下量が推定されている⁶⁾。ただし、海上においては降下量データが観測されていないため、まだまだ不確実性が大きい。日本学術会議の領域大気モデルの相互比較結果⁹⁾からもばらつきの大きさを理解することができる。また大気からの降下の海洋への影響は、2011年4月までの初期に支配的であり、その後は無視できる程度であると推定されている。

3. 海洋における挙動評価

3.1 沿岸スケール

2011年4月15日の表層¹³⁷Cs濃度分布のシミュレーション結果を図2(a)に示す。30 km沖合においても 1.0×10^5 Bq/m³を超える濃度が観測されたことと整合的である分布を示している。表層水温分布の衛星データでも観測されているように、茨城沖に時計回りの中規模渦(暖水塊)が存在している⁶⁾。中規模渦の影響によって、茨城沖の¹³⁷Cs濃度は低く保たれた。5月末にはこの中規模渦が消滅し、高濃度の水塊が茨城沖を南下した。銚子近傍の波崎における¹³⁷Cs濃度の観測データは5月末までは低い水準を推移するが、6月になると上昇している¹⁰⁾。

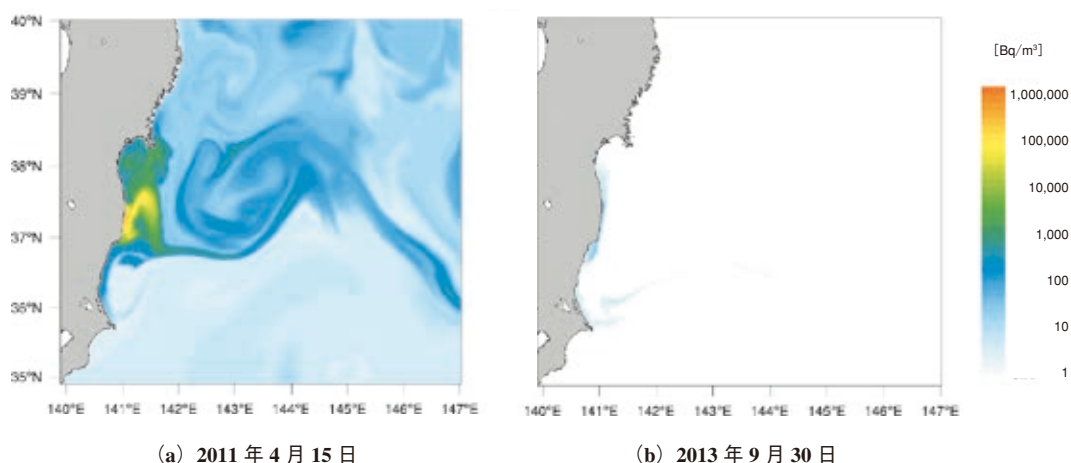


図2 福島沖合の表層 ^{137}Cs 濃度分布のシミュレーション結果

福島沖合シミュレーション⁶⁾においては、海洋再解析データ (JCOPE2¹¹⁾) に同化することによって、中規模渦の効果の再現に成功している。2013年1月以降は 3.0×10^{10} Bq/day の漏洩が継続した場合の、2014年9月30日のシミュレーション結果を図2(b)に示す。事故前のバックグラウンド濃度と比較して、検出可能な海域は沿岸域にとどまっている。これは、最近の観測結果と整合的である。

ただしモデルには不確実性がある。より解釈を深めるためには、複数のモデルの相互比較により、その類似点と相違点を理解することが重要である。そのような観点に立ち、福島第一原発事故を対象としたモデル相互比較が行われている。事故後、早い段階で国内外の5つの沿岸モデルの相互比較が行われた¹²⁾。その後、国内外の11の沿岸モデルの相互比較を行った日本学術会議報告が2014年10月に公開された⁹⁾。沿岸に沿った拡散など特徴的な現象は共通するものの、中規模渦の再現の有無などモデル間のばらつきには注視する必要があるとまとめられている。また、航空機モニタリングデータの解析によって、表層 ^{137}Cs 濃度の面的に詳細な分布が得られた¹³⁾。航空機モニタリングの海洋への適用は今後の課題となるが、採水による観測

では得られない詳細な分布は、モデルの相互比較のためのデータとしても有益となる。

3.2 北太平洋スケールでの挙動

北太平洋スケールにおいては、これまで述べてきた沿岸域スケールと比べ、濃度レベルは低く、漁業に影響を及ぼすことはないと考えられている。事故初期からの篤志船による観測によって、表層濃度においては希釈が進んでいることが確認されている¹⁴⁾。また、中層水の形成の結果として、福島第一原発起源の放射性物質が中層に移行していることも観測されており¹⁵⁾、海洋学的な視点からの現象解明が望まれている。

一例として ROMS による北太平洋スケールのシミュレーションを図3に示す⁶⁾。これらの結果は、観測結果と整合的である。大きな供給は初期にあったので、濃度のコアは黒潮主流に沿って、中央部に移動していることが確認できる。東日本大震災による瓦礫はアメリカ海岸に1年で流れ着いたが、放射性物質は希釈し、かつ中層に潜りこむので、アメリカ大陸への影響は小さいと推定されている。数値シミュレーションにおいては中層水の再現性の向上が問題となっており¹⁶⁾、モデルによる再現についての議論も重要となる。

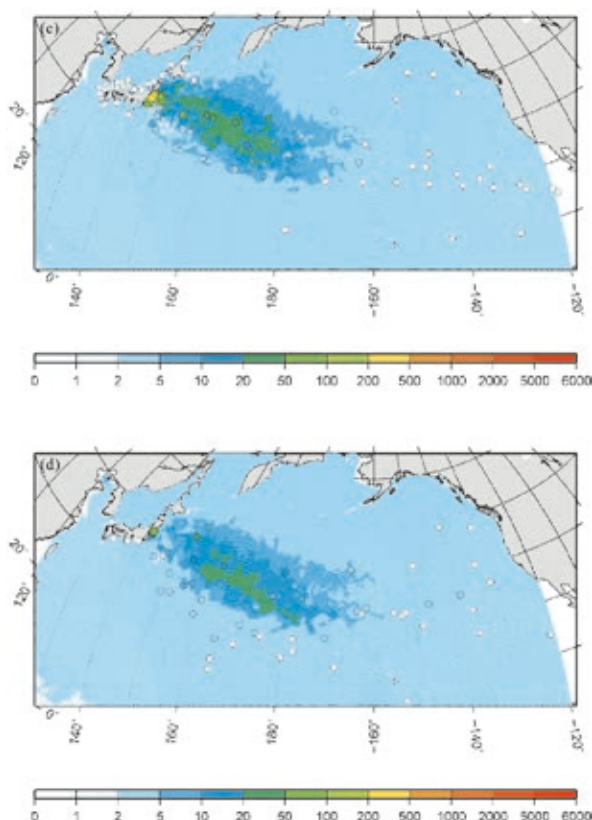


図3 北太平洋の表層 ^{137}Cs 濃度分布

(上) 2011年10～12月の観測値を点で示す。2011年11月15日のシミュレーション結果をコンターで示す。
(下) 2012年1～3月の観測値を点で示す。2012年2月15日のシミュレーション結果をコンターで示す。単位は Bq/m^3

3.3 海底堆積物・海生生物への移行

海底堆積物への移行に関しては、海水の ^{137}Cs 濃度のシミュレーション結果⁶⁾を基に、海底堆積物への吸着・脱着過程による移行のみを考慮したシミュレーションによって、観測結果¹⁷⁾と整合的な結果を得ている¹⁸⁾。海底堆積物への移行量は、海洋へ供給された放射性物質の10%以下と見積られ、海水の挙動把握を行う際には、海底堆積物による除去は無視できることを示している。一方で、沿岸の詳細観測からは、海底堆積物中の放射性物質濃度分布は非常に複雑であり、定常状態ではないと指摘して

いる¹⁹⁾。河川からの供給や、海洋中における移動に関しては、ROMSを用いた海底堆積物の移動に関するシミュレーションの取り組みが行われており、浸食域と堆積域の違いが見積もられている²⁰⁾。

海生生物への移行については、福島第一原発近傍において、海水濃度の再現シミュレーション結果を用いた動的な海生生物移行シミュレーションによっておおむね ^{137}Cs 濃度変化を再現できている²¹⁾。ただし、福島第一原発事故の影響の観測が開始される2011年3月21日以前の海水 ^{137}Cs 濃度の再現性の検証はできておらず、今後の課題となる。また、一部の底魚の濃度低減率が低いという問題もあり、海底堆積物からの移行過程などもあわせて解明する必要がある²²⁾。

4. おわりに

海洋中の ^{137}Cs 濃度は、漏洩率の低下及び海洋の持つ希釈能力によって低下している。しかし福島沿岸の漁業自粛、出荷停止はいまだ継続しており、福島第一原発事故の収束に至っていない。また、福島第一原発からの漏洩の継続が指摘されていることに加え、敷地内には高濃度汚染水が存在しており、今後の漏洩リスクも無視できない。本稿で述べたようにシミュレーションなどの有効な手段も組み合わせ、現状の海洋汚染状況や海洋中の挙動を把握した上で、対策を考えることが重要であると考えられる。また、 ^{90}Sr 、 ^3H など他核種も観測されており、今後考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 原子力規制庁, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/428/list-1.html>
- 2) 東京電力, <http://www.tepco.co.jp/decommission/planaction/monitoring-j.html>
- 3) 青山道夫, *Isotope News*, **692**, 10-14 (2011)
- 4) 津旨大輔ら, 電力中央研究所報告書, V11002

- (2011)
- 5) Tsumune, D., *et al.*, *Journal of Environmental Radioactivity*, **111**, 100–108 (2012)
- 6) Tsumune, D., *et al.*, *Biogeosciences*, **10**, 5601–5617 (2013)
- 7) Kanda, J., *Biogeosciences*, **10**, 6107–6113 (2013)
- 8) 原子力規制庁 (2013), https://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/tokutei_kanshi_wg/data/0005_01.pdf
- 9) 日本学術会議 報告 (2014), http://www.jpгу.оrg/scj/report/20140902scj_report_j.pdf
- 10) Aoyama, M., *et al.*, *Geochemical Journal*, **46**, 321–325 (2012)
- 11) Miyazawa, Y., *et al.*, *J. Oceanogr.*, **65**, 737–756 (2009)
- 12) Masumoto, Y., *et al.*, *ELEMENT*, **8**, 207–212 (2012)
- 13) Inomata, Y., *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, DOI: 10.1080/00223131.2014.914451 (2014)
- 14) Aoyama, M., *et al.*, *Biogeosciences*, **10**, 3067–3078 (2013)
- 15) Kumamoto, Y., *et al.*, *Scientific Reports* **4**, Article number: 4276 (2014)
- 16) 坪野考樹ら, 電力中央研究所報告書, V13009 (2014)
- 17) Kusakabe, M., *et al.*, *Biogeosciences*, **10**, 5019–5030 (2013)
- 18) Misumi, K., *et al.*, *Journal of Environmental Radioactivity*, **136**, 218–228 (2014)
- 19) Otsuka, S. and Kobayashi, T., *Environ. Monit. Assess.*, **185**, 5419–5433 (2013)
- 20) 内山雄介ら, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), **70**, 571–575 (2014)
- 21) Tateda, Y., *et al.*, *Journal of Environmental Radioactivity*, **124**, 1–12 (2013)
- 22) 立田穰, *Isotope News*, **719**, 32–36 (2014)

(電力中央研究所)